

青岛大沽河流域防洪决策支持系统

方红卫^{1 2}, 郑毅^{1 2}, 张彬^{1 2}, 韩冬^{1 2}, 陶迎春³

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084 ; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084 ;
3. 北京大学地球空间信息系统实验室, 北京 100871)

摘要 : 将水文学与水力学相关模型结合起来, 采用 VB 语言和 MapX 控件, 开发了集数据采集、属性查询及结果显示等功能于一体的大沽河流域防洪决策支持系统。具体的技术路线是: 用分布式概念性水文模型模拟流域内支流汇入水库和河道的流量, 用一维水力学模型模拟洪水传播过程中河道内水位、流量的变化, 用二维水力学模型模拟堤坝漫溢处的淹没范围。该系统的应用对青岛大沽河区域的防汛工作起到了积极作用。

关键词 : 防洪决策支持系统; 洪水预测; 模型集成; 分布式水文模型

中图分类号 : P338 **文献标识码** : B **文章编号** : 1006-7647(2008)03-0066-04

Decision-support system for flood control in Dagu River Basin in Qingdao / FANG Hong-wei^{1 2}, ZHENG Yi^{1 2}, ZHANG Bin^{1 2}, HAN Dong^{1 2}, TAO Ying-chun³ (1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China ; 2. State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China 3. Institute of RS & GIS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract : Based on a hydrological model and some hydraulic models, a decision-support system for flood control in Dagu River Basin, which is located in Qingdao, Shandong province, is established, with the functions of data collection, attribute inquiry and result display. The distributed hydrological model SWAT is used to simulate the inflow from the tributary to the reservoir and main stream, then the one-dimensional hydraulic model is used to simulate the discharge and water level in the channel and the two-dimensional one to simulate the flooded area when certain sections of the river banks are inundated or broken. The decision-support system for flood control, based on the display platform developed by MapX, has played an active role in flood control in Dagu River Basin.

Key words : decision-support system for flood control ; flood forecasting ; model integration ; SWAT model

1 防洪决策支持系统

随着社会经济的全面发展, 水的问题和矛盾也日益突出和尖锐, 在一定的流域范围内, 洪水问题、水资源问题和水环境问题等集中成为流域管理中的主要矛盾。对洪水问题的研究, 不仅可以防止灾害、减少损失, 还可以实现小洪水或者错峰洪水的资源利用, 以及有效地追踪污染物随洪水的运动轨迹, 预防由洪水引发的水质污染等, 这对水资源问题和水环境问题的解决都将具有重要意义。

随着通信和计算机技术的迅猛发展, 包括流域雨情、水情(冰情)、工情、气象信息、灾害信息和其他信息的测量和传输技术也日新月异。各类专业自动测量设备使数据可以通过网络等途径迅速地传输到数据处理中心, 依靠大型数据库对海量数据进行分

析、筛选、存储和挖掘, 再调用相关的专业模型对这些数据模拟计算, 计算结果在显示平台上生动直观地展示给管理人员, 使他们可以及时地了解洪水发生和发展的全过程, 这就是防洪决策支持系统的基本原理。

对于单一过程模型的研究, 洪水模拟已经比较成熟^[1-3]。但这些水文学和水力学模型分布在水科学的不同分支, 如产汇流和土壤水运动属于水文学分支, 一、二维水动力学模型属于水力学分支, 尚不能从系统的角度把相关的模型集成到洪水管理系统这个统一的平台上, 建成各类模型的模型库。要对一场洪水进行现代化的管理, 必须对洪水和可能的灾害状况进行有效预测, 这就要求把模拟洪水产生、演进和漫溢等现象的模型有效组合起来进行整体模拟。

本文把水文学与水力学相关模型结合起来, 采

易于集成的 VB 语言和 GIS 组件 MapX ,开发了集数据处理、属性查询及结果显示等功能于一体的防洪决策支持系统。该系统主要包括系统数据库和 GIS 模块、产汇流模块、河道一维水力学演进模块、洪水淹没二维水力学模块等。系统运行的技术路线是 :首先利用产汇流模型根据地形、植被、降雨等数据模拟出各个子流域的出口流量过程 ,为干流一维水动力学模型提供上游流量条件和支流汇入过程 ,并结合下游水位边界条件来模拟干流河道的水位、流量变化 ,再利用二维模型模拟溃堤和漫溢河段的淹没情况。青岛大沽河流域防洪决策支持系统的组成和结构见图 1。

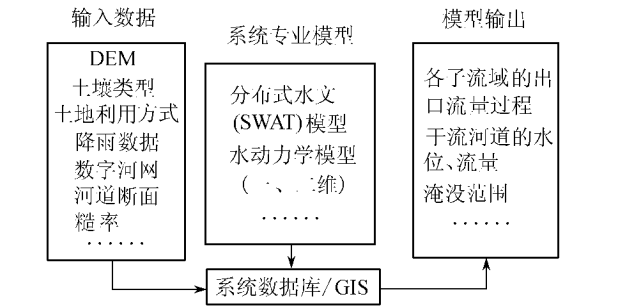


图 1 大沽河流域防洪决策支持系统示意图

把水文模型与水力学模型结合起来联合运用 ,可以更准确地考虑支流汇入对干流洪水的影响 ,从而提高系统的模拟精度。此外综合运用水文学与水力学模型 ,可以全面地反映从降雨到洪水产生、发展和造成淹没的全过程 ,为更准确地掌握水情和发布预报方案提供科学依据。

2 系统数据库和 GIS

2.1 系统数据库

系统数据库存储和管理 4 类数据 :空间数据、属性数据、数据目录数据和基于 Web 页的数据 ,其中重点和难点在于空间数据的存储和管理。空间数据主要包括以一定比例尺的地图为信息源建立的地名、居民点、水系、道路、地界等基本数据。它除了表示物体的形态信息外 ,还需要表示物体的实体属性和空间位置如拓扑关系等相关信息。大沽河防洪决策支持系统采用 SQL Server 2000 作为系统数据库。

2.2 GIS 表达

GIS 的表达功能主要是对空间数据 ,如河网水系、水库、雨量站、公路、铁路、行政区划以及由水文学、水力学等模型模拟的河流水位、流速、淹没范围等要素的直观表达。其中二、三维可视化模块采用虚拟现实技术对实际流域进行立体化表现 ,全方位地展示空间的各类信息。GIS 系统基于专题地图分层来表达所描述的各类地理特征 ,表现为具有拓扑

关系和分类属性的几何对象。图 2 是防洪决策支持系统所显示的青岛市大沽河流域行政区划以及铁路、公路、河流、雨量测站等分布情况。

2.3 雨情、水情、工情的表达

雨水工情可视化模块的功能主要是直观显示流域的雨情、水情和工情等。雨情包括降雨历时、降雨量和降雨分布等 ;水情包括各处水流的流向 ,汇入河流的流量、水位、水深等 ;工情主要包括水库蓄水情况、河道的两岸堤防、橡胶坝等运行状况。防洪决策系统所要求的雨情、水情和工情等都可以在系统界面中实时显示。图 3 为该系统显示的青岛市某时刻的雨情状况。



图 2 青岛市行政区划和交通干线分布



图 3 青岛市内雨量站及降雨实时显示

用户在地图上移动鼠标到某个站点时 ,点击后 Web 服务器以所选站站号信息作为连接实时水文属

性数据库的条件,并结合时间等要素对数据库进行查询操作,查询结果以水情直方图(雨情站点)或者水位过程线(水情站点)返回到浏览器端。若某个水情站点的水位超过警戒值或雨情站点的雨量超过某个量级时,系统将用红色符号来表示该站点,实行危险警报。

3 系统专业模型

3.1 水文模型

流域洪水模拟预测精度和效率的提高都离不开水文模型的进步。基于物理基础的分布式水文模型(SWAT模型),因其可以较全面地模拟流域各处的水文过程,满足人们进一步探索水循环原理和演变规律的要求,成为当前水科学界研究的热点和重点。分布式物理模型或紧密耦合型的分布式水文模型,一般基于网格计算单元,控制方程为偏微分方程,运算量大,对计算机性能的要求较高^[4],尤其在模拟大型流域的洪水演进和淹没时,即使采用集群或并行计算也会耗时较长,这必然会影响洪水预报的实效性。SWAT模型由于采用分布式的模型结构,模拟原理也主要基于经验公式,或者只需求解简化后的偏微分方程,可以满足洪水模拟精度和效率的要求。

本文所建立的大沽河防洪决策支持系统采用SWAT模型来模拟每条支流河段的汇入水量^[5-6]。在应用SWAT模型时,首先需要对资料进行处理,使输入数据如DEM、数字河网、土地利用方式、土壤分布和雨量站位置等GIS文件具有一致的投影和坐标系。大沽河地区的DEM(90 m×90 m,2003年数据)、土地利用方式(2003年8月数据)、河网、水库、雨量站及对应降雨信息等已知。该流域的植被分布比较复杂,分为耕地、林地、草地、水域、工矿、城乡、居民用地及未利用土地(沙地、沼泽和裸地)六大类。其中耕地作物类型一年四季有较大差异,但该流域洪水主要集中在6~9月,期间植被主要以小麦、夏玉米和水稻为主,土壤分布主要有3类,其中棕壤土约占60%,砂姜黑土和潮土分别占20%,降雨信息包括全流域124个雨量站的雨情信息,表达格式为降雨测站对应某个时段的降雨总量,通过专用网络实时传输到信息中心。在应用SWAT模型时,由于流域下垫面的不均匀性,先把DEM划分成地形相对均匀的子流域(大沽河流域共划分为33个子流域,每个子流域内设1个水文响应单元),综合考虑了土壤、土地利用等因素后,利用具有代表性的饱和水力传导度(13~22 mm/h)、土壤孔隙率(0.40~0.45)和田间持水量(0.19~0.22)等变量来表征整个子流域的产汇流属性。

3.2 一维洪水演进模型

一维明渠非恒定流的控制方程圣维南方程组包括连续方程和运动方程^[7]。应用该模型时,根据收集到的大沽河干流断面资料把干流河道划分为119个计算断面,其中河道糙率根据大沽河流域管理处提供的设计洪水20年一遇、50年一遇和100年一遇的洪水水位过程线进行分段率定。经过率定后河道内主槽糙率约为0.025,滩地糙率为0.040~0.045。系统对干流模拟设定的输入条件包括断面编号、各断面对应上游河流源头的起点距、河底高程和水位等。对于一维模型的离散求解,采用属于差分求解的四点偏心Preissmann格式,该格式具有良好的稳定性和收敛性,计算速度也较快。

3.3 二维洪水淹没模型

平面二维水流运动采用二维圣维南方程组,具体公式见文献[8]。二维模型离散采用迎风格式,数值计算方法采用ADI法,计算网格采用正交均匀网格。应用该模型时,根据DEM栅格进行网格划分,整个计算区域内共有1660×1440个矩形网格,网格边长为90 m,对网格高程按DEM栅格数据进行赋值,淹没区域的糙率取值可参考文献[9],如草地糙率为0.035,林地为0.045,耕地为0.040,矮树丛为0.06,树木为0.1等。

4 模型连接

整个模型系统运行从水文模型开始,水文模型的输入条件包括2个方面:一是预先根据DEM划分好子流域,根据土壤、植被等资料确定基本的产汇流参数;二是输入流域的降雨信息,如不同雨量站从某时刻开始一段时间内的降雨总量、起始时刻和间隔时间都可通过交互界面由用户选择。水文模型的主要输出为各子流域的净雨量及出口断面的流量。

水文模型的模拟结果为干流洪水演算提供了各支流出口断面的流量过程以及水库的入库流量。自产芝水库以下,较大支流依次有瀙河、小沽河、五沽河、城子河、落药河、流浩河和桃源河等(图3)。大沽河流域干流一维洪水模拟以产芝水库为计算起点,由该水库水位~库容~泄量曲线通过雨前库水位、入库流量可确定对应的泄流量^[10],得出的泄流过程为干流一维洪水模拟提供了上边界条件。但这种泄流方式并没有考虑流域上下游是否同步降雨或者下游是否有错峰要求,尤其当上下游都发生较大暴雨时,更需要综合考虑水库泄流上限及相应的泄流时间。除了由水位~库容~泄量曲线确定该水库的泄流外,还需结合不同标准洪水的调度来确定泄流上限,需要综合考虑雨前库水位、日净雨量、水库

是否控泄以及上下游降雨是否同步等计算该水库的允许最高水位和最大泄流量。例如,若上下游同步降雨,日净雨量在 105 ~ 140 mm 之间时,水库的泄流可在 800 ~ 1 060 m³/s 范围内,其中库水位不能超过 73 m^[10]。流域净雨量可由气象部门预报的降雨情况,通过水文模型或者经验公式来确定。产芝水库的泄流过程由该水库水位~库容~泄量曲线和不同标准洪水调度来综合确定,以此确保水库下泄洪水与下游区间洪水组合演进到保护对象时的流量不大于最大安全流量。

干流演算的下边界条件为大沽河入海口潮汐水位,该水位是由潮汐与河口洪水共同作用的复合潮位,不同的重现期对应不同的水位值(该水位为黄海高程系)^[11]。一维水力学模型的输入信息有河道断面资料、各断面糙率、支流汇入过程以及上下游边界条件和初始条件,输出信息为各断面的水位和流量值。

一维水力学模型模拟完成后,再应用二维淹没模型进行计算。二维模型计算的边界条件包括 2 个方面:一是河道内水位高于两岸堤防高程的河段,即溢出河段;二是因堤防溃决而导致的某些淹没地段。水流漫溢的宽度将随时间而变化,漫溢开始时以漫溢断面上下各一半的宽度进行计算,随着漫溢断面的增加,漫溢宽度增加至若干个漫溢断面。如果是由溃口而导致的漫溢,则一般需要假设溃口宽度,如 10 m、50 m、100 m 等多个宽度进行选择。利用二维水力学模型,把溢出河段或堤防溃决地段的流量作为二维模型的边界条件,进而计算水流演进模拟洪水淹没情况,并在 GIS 图层中进行表达。

在系统运行过程中,用户不需要了解数据文件的具体结构和格式,只需通过 GIS 的图形界面来进行不同模型的操作,模型的读取和输出与 GIS 之间

是自动双向存取的,不需要人工干预,因此专业模型与 GIS 属于紧密耦合型^[12]。

5 系统的测试运行

该系统目前已安装在青岛市大沽河流域管理处进行测试运行。考虑到整个流域防汛信息系统运行的实时性,水文模型和一维水力学模型的计算时间控制在 1 min 之内,二维淹没模型运行时间控制在 2 min 之内。图 4 和图 5 是在设计降雨条件下大沽河河道治理以前的洪水和淹没情况,其中图 4 是产芝水库敞泄情况下,10 年一遇洪水干流河道的沿程水位。由图 4 可知在 10 年一遇洪水情况下,自产芝水库河道水位依次从 42 m 递减到中游约 13 m,再到下游入海口附近约 4 m,但沿程河道水位均没有超过两岸堤防高程,这表明大沽河河道治理以前就可以抵御 10 年一遇的洪水。图 5 是流域中下游区域发生 50 年一遇洪水,产芝水库敞泄情况的洪水淹没图。图 5(a)是降雨 2 h 后洪水的漫溢淹没情况,图 5(b)是降雨 3 h 后洪水淹没情况。在 50 年一遇洪水情况下,降雨发生 2 h 后,大沽河中下游尤其是即墨市与大沽河干流之间的区域发生了大范围的洪水淹没,洪水涌向河道左岸地势较低的平原区;降雨发生 3 h 后,洪水淹没范围比 1 h 前的淹没范围更大,这说明大沽河河道治理以前河道的行洪能力不足以抵御 50 年一遇的洪水,尤其是河岸左堤比河道水位低,应采取相应加高措施。本文所建立的系统还可以计算出实时降雨条件下流域的产汇流,干流河道水位、流量,以及堤防出险后的淹没情况,这些均为该流域的防洪决策提供了技术上的支持。

6 结 论

水文学与水力学模型分别属于水科学的不同分支。

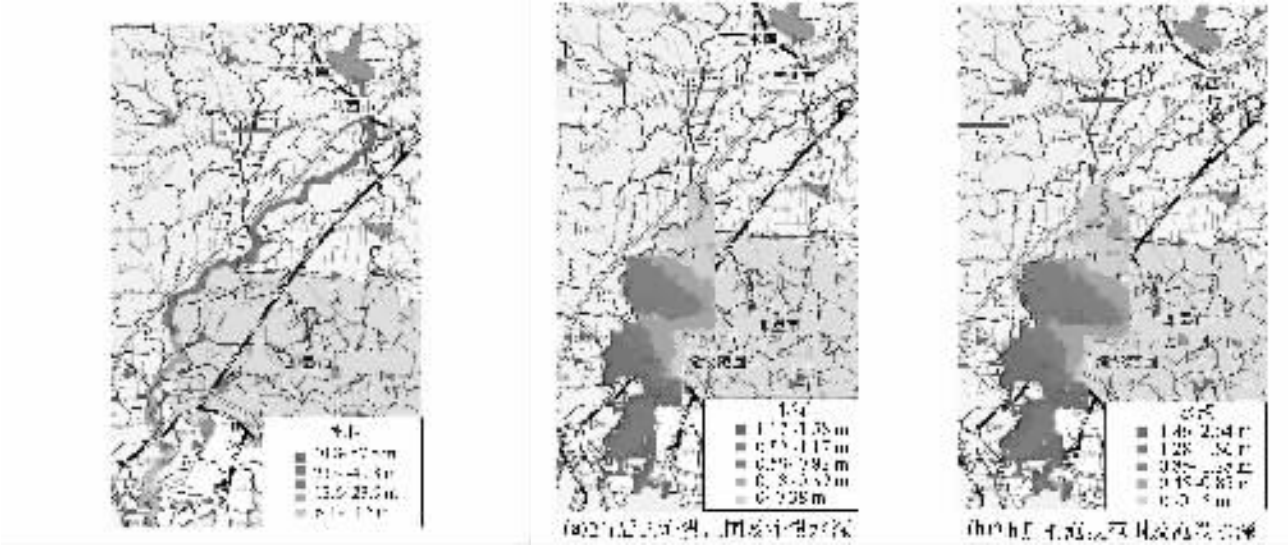


图 4 10 年一遇洪水干流河道计算水位值

图 5 50 年一遇洪水时漫溢范围示意图 (下转第 94 页)

[27] 王新建 陈建生. 温度探测土坝圆柱状集中渗漏模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(4): 31-36.

[28] 王新建 陈建生. 堤坝集中渗漏温度场探测模型及数值试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 81-86.

[29] 王新洲. 非线性模型能否线性化的使用依据[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(2): 145-148.

[30] 肖庭延, 于慎根, 王彦飞. 反问题的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 13-69.

[31] 段永刚 陈伟 黄诚. 井筒与油藏耦合条件下的水平井非稳态产能预测(I): 数学模型[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 11-15.

[32] 黄涛 杨立中. 隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 554-559.

[33] 黄涛 杨立中, 陈一立. 工程岩体地下水渗流-应力-温度耦合作用数学模型的研究[J]. 西南交通大学学报: 自然科学版, 1999, 34(1): 11-15.

[34] 韦立德 杨春和. 考虑饱和-非饱和渗流、温度和应力耦合的三维有限元程序研制[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 100-104.

(收稿日期 2007-04-18 编辑 骆超)

(上接第 69 页) 在防洪决策支持系统中, 单纯利用水文学模型不能有效地模拟干流水位和淹没范围; 单纯利用水力学模型无法模拟流域内复杂的产汇流情况, 也不能准确地计算河道的区间入流情况。基于此, 本文尝试采用分布式概念性水文模型与一维洪水演进模型、二维洪水淹没模型相嵌套, 以松散结合方式组成防洪决策支持系统, 进而模拟了青岛大沽河流域干流洪水演进和淹没情况。

本文建立的系统已在青岛大沽河流域实际的防洪任务中发挥了积极作用, 通过未来几年洪水资料的率定和验证, 能够不断提高预报精度和水平。但是该系统还有较大的发展空间, 具体表现在: 基础资料和数据还需要更新和完善, 包括土壤类型、植被情况以及铁路、公路的地形更新等。同时, 该流域实测流量过程非常少, 很多关键参数只能凭借使用者的经验, 使得系统的准确性有所降低。另外模型结果的直观显示等方面也有待完善, 有必要开发表达更形象的三维立体显示功能等。

参考文献:

[1] 李纪人. 数字地球与数字水利[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 14-16.

[2] 芮孝芳, 石朋. 数字水文学的萌芽及前景[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 55-58.

[3] 芮孝芳. 洪水预报理论的新进展及现行方法的适用性[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5): 1-4.

[4] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[5] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 563-572.

[6] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool[R]. Texas: Grassland Soil and Water Research Laboratory, 2005.

[7] 周学漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

[8] 黄炳彬, 方红卫, 刘斌. 复杂边界水流数学模型的斜对角笛卡尔方法[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2003, 18(6): 679-685.

[9] 余常昭. 水力学: 下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.

[10] 滕胜叶. 青岛市大中型水库防汛控制运用资料汇编[G]. 青岛: 青岛市水利局, 1999.

[11] 青岛市水利勘测设计研究院. 青岛市大沽河防洪工程规划[R]. 青岛: 青岛市水利局, 1999.

[12] 万洪涛, 周成虎, 万庆, 等. 地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 560-568.

(收稿日期 2007-07-12 编辑 骆超)

(上接第 83 页)

[27] 张幸农 应强 陈长英, 等. 江河崩岸现象形成原因和机理的研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.

[28] ZHANG Xing-nong, YING Qiang, CHEN Chang-ying, et al. Experimental study on mechanism of bank collapse in the Yangtze River[C]//SHAO Xue-jun. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation: volume III. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1654-1658.

[29] 刘东风. 长江安徽段崩岸原因分析及工程防护方案思考[C]//长江护岸工程及堤防防渗工程技术经验交流会(第六届) 论文汇编. 武汉: 长江重要堤防隐蔽工程建设管理局, 长江科学院, 2001: 70-75.

[30] 黄本胜, 白玉川, 万艳春. 河岸崩塌机理的理论模式及其计算[J]. 水利学报, 2002(9): 49-60.

[31] 刘汉龙, 朱伟, 高玉峰. 堤防崩岸机理及其对策探讨[C]//堤防加固技术研讨会论文集: 下册. 南昌: 水利部

国际合作与科技司, 1999: 41-45.

[32] 徐永年 梁志勇 王向东, 等. 长江九江河段河床演变与崩岸问题研究[J]. 泥沙研究, 2001(4): 41-46.

[33] 岳红艳, 余文畴. 层次分析法在崩岸影响研究中的应用[C]//长江护岸工程及堤防防渗工程技术经验交流会(第六届) 论文汇编. 武汉: 长江重要堤防隐蔽工程建设管理局, 长江科学院, 2001: 23-30.

[34] 成昆煌, 张荣国, 姜树海, 等. 长江九江市城防大堤溃口技术原因分析报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 1998.

[35] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利水电大学学报, 1999, 32(1): 21-23.

[36] 王小波, 刘红星. 影响长江中下游干流河段岸坡稳定的因素分析[C]//长江护岸工程及堤防防渗工程技术经验交流会(第六届) 论文汇编. 武汉: 长江重要堤防隐蔽工程建设管理局, 长江科学院, 2001: 65-69.

(收稿日期 2007-05-28 编辑 骆超)